中国地表日平均风与日极大风气候特征的对比

南宇琨[1]， 刘 鹏[1]， 王 伟[2,3,4]， 陈遗志[2,3,4]

（1. 南京信息工程大学，气象灾害教育部重点实验室，气候与环境变化联合国际研究实验室，气象灾害预测与评估协同创新中心，江苏 南京 210044；2. 国电南瑞科技股份有限公司，江苏 南京 211106；3. 南瑞集团有限公司（国网电力科学研究院有限公司），江苏 南京 211106；4. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室，江苏 南京 211106）

摘 要： 据多项研究指出，中国地表平均风速在全球变暖的背景下呈现长期下降的趋势。而极大风速与平均风速特征变化是否一致，值得我们关注。通过对比分析国家基本气象站1951—2018年的地表日平均风速和日极大风速数据，结果表明：全国范围内，日平均风速主要集中在2 m·s^{-1}左右，而日极大风速主要集中在8 m·s^{-1}左右，这两种风速在青藏高原地区和内蒙古地区较大。此外，日平均风速出现小风速概率更高，而日极大风速的概率分布更接近于正态分布。从1960—2010年，日平均风速下降了19%，而日极大风速下降更为显著，达到20%。然而，在2010年之后，随着全球变暖的加剧，二者均略有回升，尤其是日平均风速的回升更为显著。这一结论强调了在全球变暖背景下持续关注和研究风速变化的重要性，有助于深入了解中国地表风速的变化特征，同时也为风速预报、风能开发等项目提供科学参考。

关键词： 日平均风；日极大风；气候特征；风速差异

中国经济快速增长，各项建设取得巨大成就，然而随着经济的发展，碳排放问题愈加引起各界注意。2020年中国明确提出“双碳”计划，即2030年实现“碳达峰”与2060年实现“碳中和”，构建新型能源体系已经是我国的重要发展战略。考虑到自然资源和开发成本等多种限制因素，风能作为可再生的清洁能源，在中国有巨大的发展前景，其储量丰富且分布广泛[1-3]。然而，由于中国地形条件复杂，不同地区的风速特征存在明显差异，同一地区在不同季节的风速也有所不同[4]。为了明确中国风速的分布特征，更有效地开发风能资源，对风力分布特征进行研究非常必要。此外这项研究还可以应用于天气预报甚至空气污染预测等其他方面，为人们的生活提供更多的保障与便利。

从全国范围内风速变化趋势来看，中国近地表平均风速呈现出长期下降的趋势[5-8]，一些学者对不同季节和不同地区的风速变化趋势进行了讨论，指出在平均风速减缓的情况下，冬春季风速减小最为明显。在中国西北西部和大部分北方地区风速降低最为明显，同时大风日数也在减少[9-12]。还有一些学者考虑地形、季风等因素，或利用REOF等方法对中国进行进一步分区[13-16]，分区后所得结论基本一致。另外有学者指出全球变暖使风速减小，并且未来可能会继续下降，这可能会影响风能的开发效率[17-19]。那么在全球变暖的背景下，平均风速和极大风速是否会保持一致的下降趋势？通过我们的研究，突出了这一科学问题，为更多学者研究相关方面的科学本质提供坚实的观测支撑。

如果要将风能应用于发电，还必须考虑到极大风速（瞬时风速），根据林湘宁等[20]对于风能发电机功率的研究，当极大风速达到某一特定值时，风机会采取紧急控制策略，停止发电，因此，如果对当地的极大风速没有一定了解，将导致无法充分利用风能资源，所以对风速气候特征的研究，不可忽视极大风速。前人对极大风速更多地关注其引发的大风事件，例如沙尘暴和台风等[21-23]；或针对大风事件

收稿日期： 2023-07-13； **修订日期：** 2023-10-08
基金项目： 国家电网公司总部科技项目（5108-202218280A-2-68-XG）
作者简介： 南宇琨（1998-），女，硕士研究生，主要从事气候变化研究. E-mail: nyk432110@163.com
通讯作者： 刘鹏. E-mail: liupeng1998@nuist.edu.cn

较多的季节研究季节内环流特征[24-27]。

由于气候变化以及人类活动等因素的影响,无论是日平均风速还是日极大风速,其气候特征仍然存在较大不确定性。此外,中国各地区地形差异较大,表现出不完全相同的气候特征。此前研究多以日平均风气候特征为主,对极大风的研究主要集中在天气和局地方面,而对日平均风与日极大风之间的对比研究较少,因此,本文将从全国区域的角度,进行日平均风速和日极大风速的对比研究,这将为未来风速的预测或风机发电的选址等提供一定的可参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据

使用"中国地面气候资料日值数据集(V3.0)"中1951—2018年地表日平均风速和日极大风速数据,该数据集包含了中国699个基准、基本气象站1951年1月以来的日值气象要素数据,图1展示了气象站点的分布情况,站点的颜色表示其海拔高度。为了确保数据的可信性,图2统计了无缺测的日平均风速和日极大风速数据站点的数量。结果显示自1959年之后,平均风速无缺测站点数量基本保持在699站左右,而极大风速无缺测站点数量在2003年以后才迅速增加至699站。为了评估不同时间尺度数据的可信度,下文将从风速的空间分布和时间序列两个角度进行讨论(详见2.1与2.3节)。

1.2 方法

主要采用气候态分析、线性趋势分析、概率密度分布分析、相关性分析及显著性检验等研究方法。其中在计算多年平均风速数据时,对各个站点进行去缺测处理后,计算每个站点的平均风速,最后计算所有站点的平均值,以消除由于不同观测时间尺度造成的误差。相关性分析使用皮尔逊相关,并通过t分布进行相关性检验。

另外对风速阈值和年代风速增长率进行定义。利用百分位方法定义风速阈值,即将1951—2018年日平均风速和日极大风速分别按照升序排列,取不同百分位值为不同阈值。定义年代风速增长率,即某年代相对于上一年代风速的增长率,例如,1960年代风速增长率指的是1960年代的平均风速相对于1950年代风速的增长率,以此类推。

此外,根据前人研究成果,中国风速有较大的

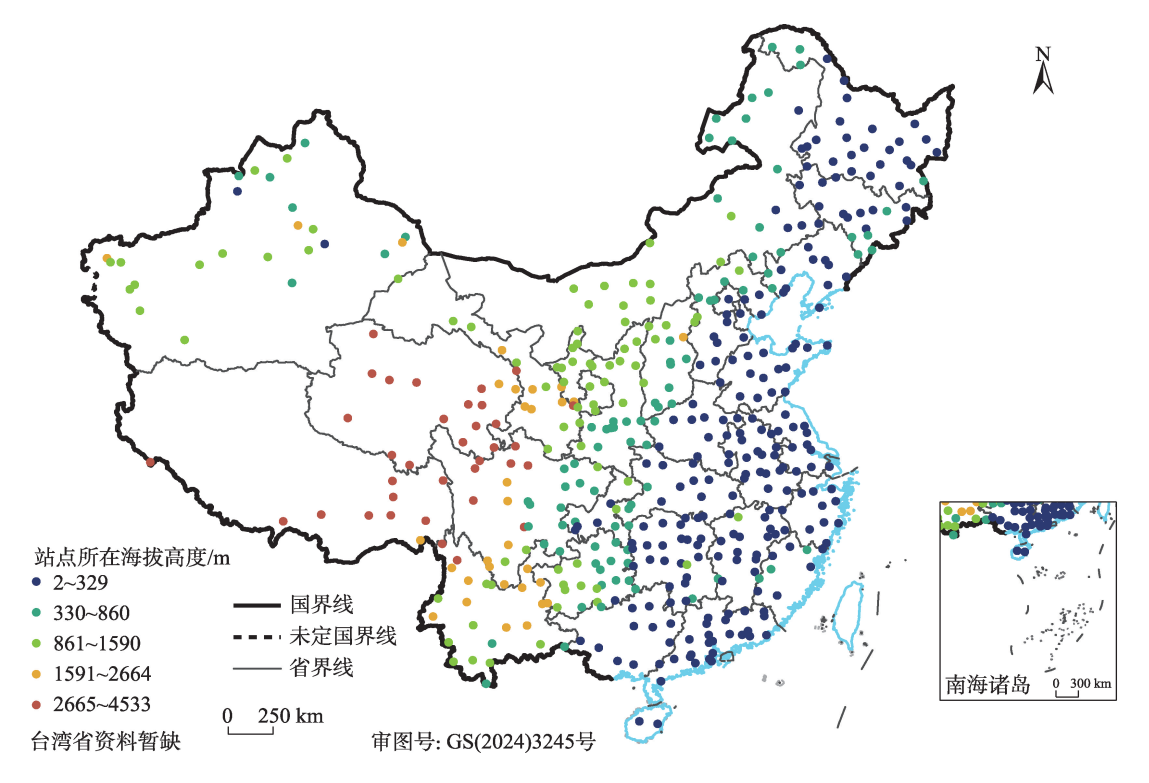


图1 1951—2018年中国699个基准、基本气象站的分布

Fig. 1 Distribution of 699 reference and basic meteorological stations in China from 1951 to 2018

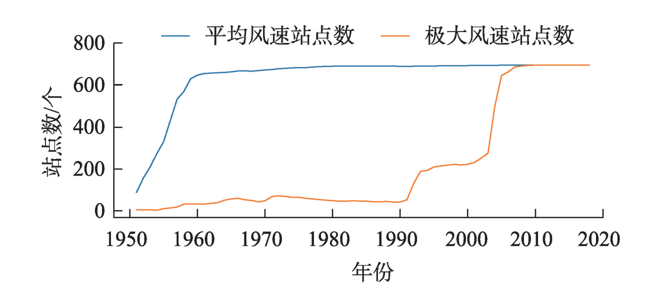


图2　无缺测平均风速和极大风速数据的站点数量

Fig. 2　The number of stations that did not have missing mean and extreme wind speed data

地区差异，对中国进行分区讨论是十分必要的，因此，选取具有代表性的区域，主要从时间演变趋势的角度研究日平均风速和日极大风速的变化特征，并将不同区域之间以及不同区域与全国风速的变化特征进行对比。

2　结果与分析

2.1　日平均风速与日极大风速空间分布对比

中国幅员辽阔，风速受地理位置和地形因素的影响，不同区域的气候特征存在较大差异。首先从空间分布特征来看，图3展示了1951—2018年地表日平均风速气候态空间分布，可以看出，在北方地区、部分沿海地区以及高原地区风速较大。具体来说，内蒙古中西部地区、青藏高原、东北地区中部以及部分沿海地区的年平均风速可达3.5 m·s^{-1}以上，其中内蒙古中西部地区及部分沿海地区的年平均风速甚至高达5 m·s^{-1}。相反，中国南方地区、内陆和盆

(a) 年平均　(b) 冬季　(c) 春季　(d) 夏季　(e) 秋季

风速/(m·s^{-1})　10.0　0.5　国界线　未定国界线　省界线　0 500 km　南海诸岛　0 300 km

台湾省资料暂缺，图中为插值结果

审图号：GS(2024)3245号

图3　1951—2018年地表日平均风速气候态空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of daily mean wind speed during 1951–2018

地风速较小，其中南方地区年平均风速在2 m·s⁻¹以下，而四川盆地年平均风速不足1 m·s⁻¹。季节性变化在空间分布中也有所体现，春季风速大，且大风速地区范围广，内蒙古、东北、青藏高原地区的风速均达到4 m·s⁻¹以上，除四川盆地小部分地区外，中国中部、南部风速也可达到1 m·s⁻¹以上。冬季夏季平均风速次之。秋季风速最小，除了内蒙古北部地区，全国风速基本分布在2.5 m·s⁻¹以下。考虑到站点数量，若仅使用1959—2018年日平均风数据进行气候态空间分布分析，所得结论与1951—2018年数据一致（图略）。

图4为1951—2018年地表日极大风速气候态空间分布，可以看出青藏高原地区日极大风速较大，可达13 m·s⁻¹以上，中国中部和东南部地区日极大风速则在8 m·s⁻¹以下。从季节角度来看，日极大风速有明显的季节性差异。春季风速最大，整个青藏高原、内蒙古的日极大风速可达14 m·s⁻¹以上，其他地区的日极大风速也基本维持在7 m·s⁻¹以上。随后夏季和秋季日极大风速逐渐减小，中国中部地区日极大风速可降至6 m·s⁻¹以下。而西藏、东北、中部、南部地区日极大风速在冬季继续下降，只有青藏高原地区日极大风速增大，仅次于春季。若仅使用2003—2018年日极大风数据进行气候态空间分布分析，所得结论与1951—2018年数据一致（图略），说明无论是日平均风还是日极大风，即使无缺测数据的站点数量不到699个，也是可使用，其结论

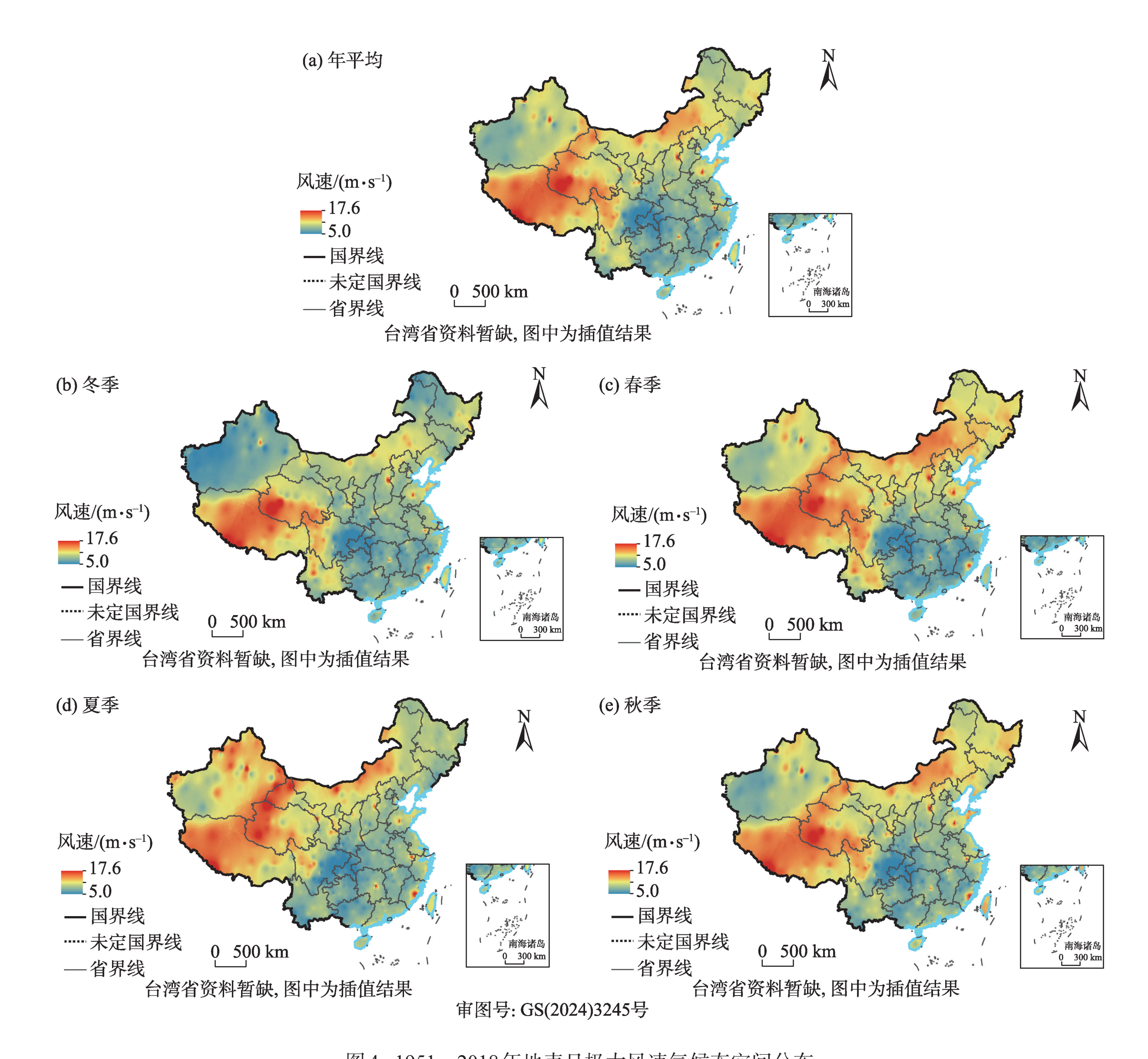


图4　1951—2018年地表日极大风速气候态空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of daily extreme wind speed during 1951-2018

也是可信的。

综合图3和图4,容易发现日极大风速的平均分布与日平均风速的平均分布存在一定的相似性和差异性。总体而言,无论日平均风速还是日极大风速,青藏高原及北方地区风速普遍大于南方地区,其中四川盆地有比较明显的静风区。不同之处在于从日平均风速角度来看,在内蒙古地区风速更大一些,而日极大风速大风区域更多在青藏高原地区,这可能与青藏高原海拔高度远高于内蒙古,容易出现大风事件有关。站点所处海拔高度呈西高东低,北高南低的分布,风速的分布大致来看也有西高东低,北高南低的特征,有学者提出高原地区风速减弱,其减弱趋势随海拔的升高而放大,高海拔环境的风速变化也更为明显[4,28],因此不能忽视风速的大小与海拔高度之间的关系。这一点在图3和图4中出现的某一站点风速远高于周围站点可以证明,如本次使用的山西省站点中五台山站海拔高度最高,可达2208.3 m,远高于其他站点,从图中可以明显看出该站点附近存在风速较大的区域,山西省平均风速2 m·s^{-1}左右,该站点平均风速可达5 m·s^{-1}以上;日极大风速平均在8.5 m·s^{-1}左右,该站点可达16 m·s^{-1}以上。

2.2 日平均风速和日极大风速概率密度及阈值的分布对比

为了更直观地展示中国不同风速的概率分布,分别绘制日平均风速和日极大风速的概率密度分布图(图5),可以看到日平均风速出现小风速的概率更大,主要分布在0~6 m·s^{-1},其中风速有90%的概率在4.5 m·s^{-1}以下。这与图3中显示的全国大面积区域风速主要分布在3 m·s^{-1}左右相一致。日极大风速的概率密度分布更接近于正态分布,主要集中在3~15 m·s^{-1}范围内,其中有90%的概率在13.6 m·s^{-1}以下。这与图4中显示的全国大面积区域风速主要分布在10 m·s^{-1}左右相一致。通过对比日平均风速与日极大风速概率密度分布,发现日平均风的分布较为集中,而日极大风的分布相对分散,大部分风速出现概率在0.1以下,说明日平均风较为稳定,而日极大风变化大,不易预测。

为了深入地研究这两种风速的关系,参考Wang等[29]对风速进行分级研究的方法,从不同阈值入手对二者进行对比分析,但Wang等人所取阈值间隔较大,不能准确反映更细致的不同阈值的风速分布,因此表1列出了不同阈值的风速及其比值。由表1可以看出阈值低于70%时,百分比每增加10%,日平均风速增长0.3 m·s^{-1},日极大风速平均增长0.8 m·s^{-1},且随着阈值的增加,风速增长均逐渐加大。结合图5与表1的信息,可以看出日平均风速出现概率较大的风速区间为0.9~4.1 m·s^{-1},日极大速为4.9~12.6 m·s^{-1},无论是日平均风速还是日极大风速,都主要集中在阈值10%~90%以内,这说明相对日平均风而言,日极大风并没有更容易出现极端事件。从比值变化来看,随着风速的增大,两种风速之比越

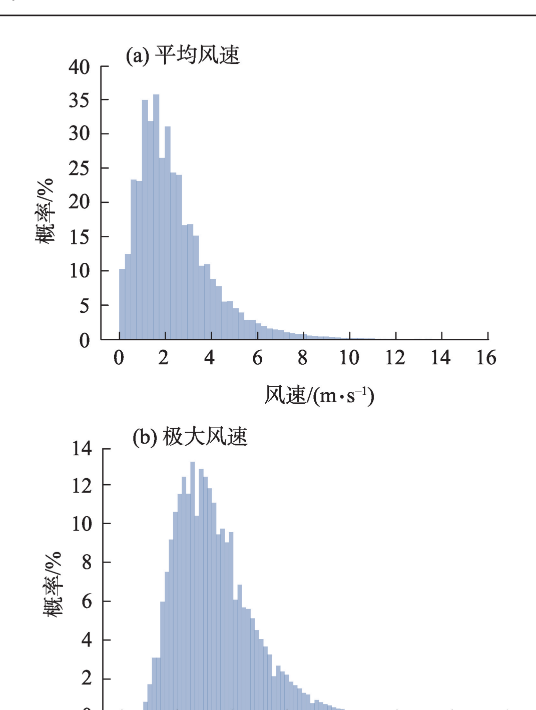


图5 风速概率密度分布

Fig. 5 Probability density function of wind speed

表1 不同阈值的风速及比值

Tab. 1 Wind speed and ratio of different thresholds

阈值百分比	日平均风速/(m·s^{-1})	日极大风速/(m·s^{-1})	日极大风速:日平均风速
10%	0.9	4.9	5.4
20%	1.2	5.8	4.8
30%	1.5	6.6	4.4
40%	1.8	7.3	4.1
50%	2.1	8.0	3.8
60%	2.4	8.8	3.7
70%	2.8	9.7	3.5
80%	3.3	10.9	3.3
90%	4.1	12.6	3.1

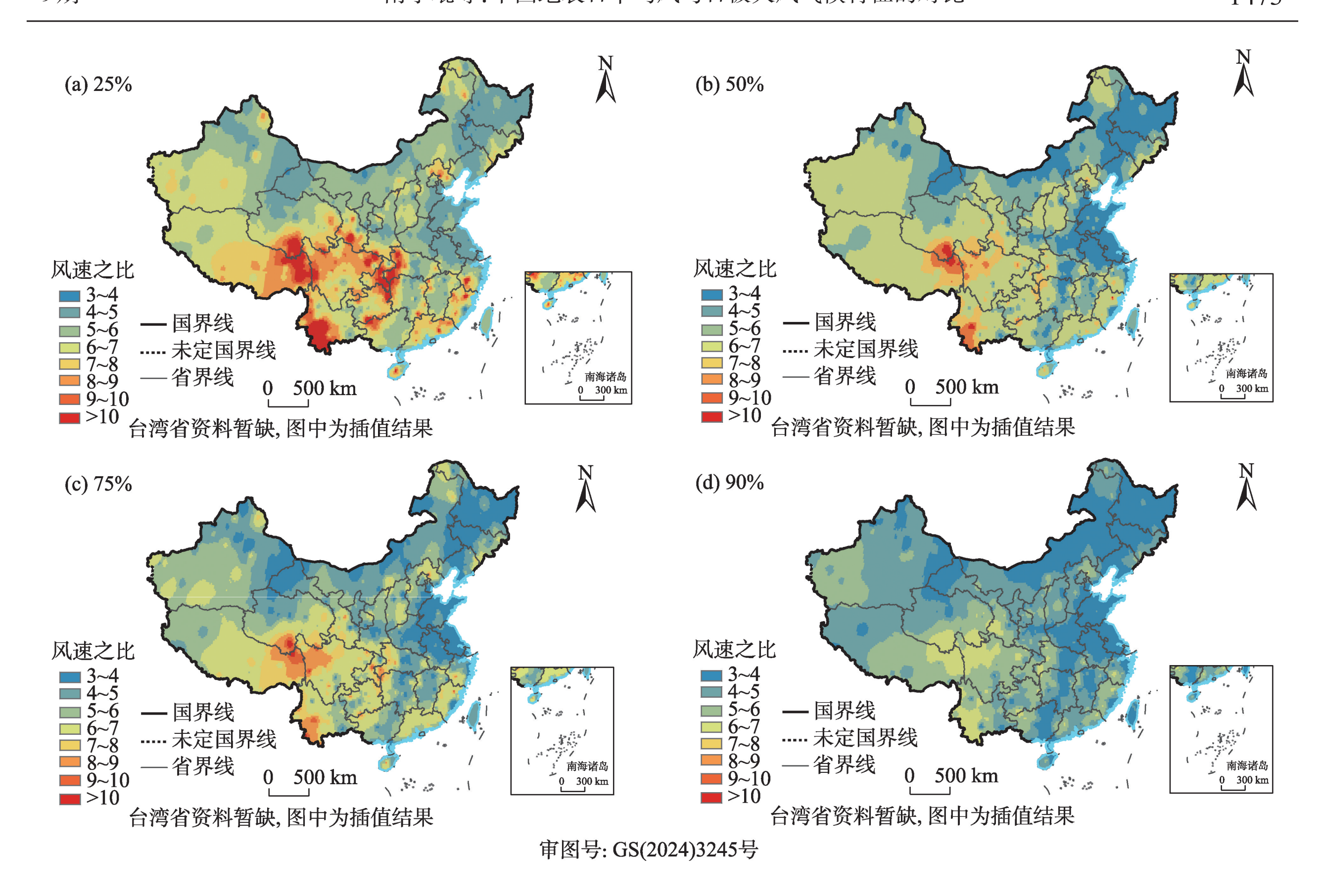


图6　日极大风速年平均与日平均风不同阈值风速之比

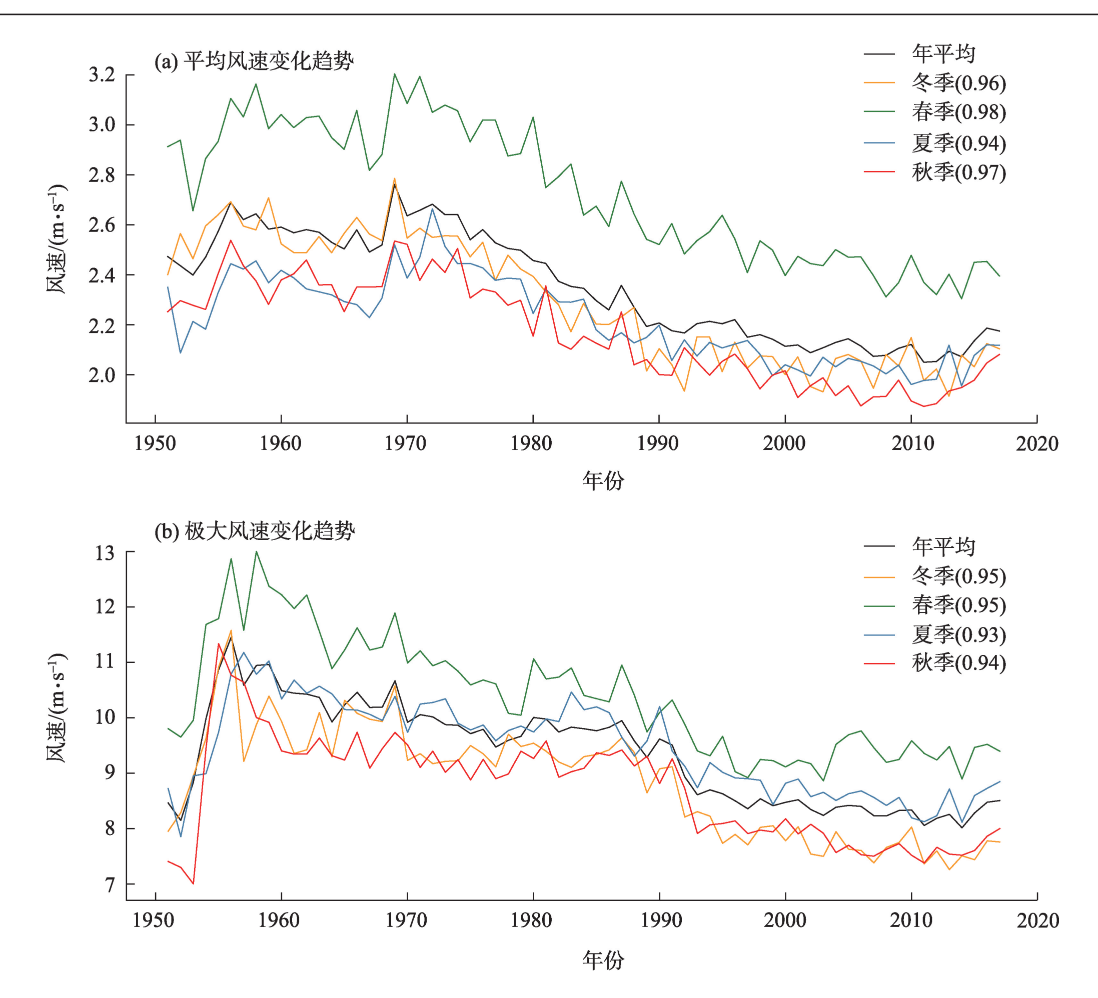
Fig. 6　Ratio of daily extreme wind speed to daily mean wind speed at different thresholds

来越小,这意味着该比值越小,日极大风速和日平均风速在日变化中出现大值的概率越大。为了验证这一结论,绘制不同阈值风速之比的空间分布,如图6所示,可以看出风速较大的地区两风之比较小,相应地,这些地区出现日极大风速和日平均风速大值的概率较大,如在内蒙古、东北等地,风速较大,且这些地区出现大风天气的概率较大。若不考虑特定阈值,日平均风速和日极大风速之比的空间分布与50%阈值空间分布类似(图略)。

2.3　日平均风速和日极大风速时间序列分布对比

从不同季节角度对风速变化趋势进行绘制,如图7所示。由图7可以看出无论是日平均风还是日极大风,整体上都呈现出下降趋势,而在2010年后有微弱上升趋势,各季节风速的变化趋势与年平均变化趋势基本一致,其中春季风速高于其他季节。此外,需注意1955年之前极大风速的快速增长与站点数据缺测减少有关。进一步分析各季节与全年风速的相关系数,发现无论是日平均风还是日极大风,春季风速变化与全年相关性最好,具体来看,日平均风速的相关系数在春季高达0.98,日极大风速为0.95。这表明在四个季节中,春季风速对全年风速变化影响最为显著。

日平均风速和日极大风速之间的相关性也值得讨论,注意到平均风速和极大风速可用数据站点的不对称,还分别选取1959—2003年(日平均风速站点满足699个,日极大风速站点少)和2003—2018年(两种数据站点均为699站),二者相关系数见表2。可以看出无论数据多少,二者之间都具有较高的相关性,说明虽然1959—2003年极大风速站点较少,但两者之间的关系并未因此发生显著变化,且相关系数与2003—2018年时间段相关系数均通过99%的显著性检验。这进一步证实了即使在极大风速站点较少的情况下,1959—2003年的数据仍然具有很好的全国区域平均代表性,结合对于风速气候态空间分布的分析,可以认为1959年之后,两者之间关系的分析,具有很高的可信度。对比图7和表2中的相关系数,不难看出日平均风或日极大风与自身不同季节间风速的相关性高于日平均风和日极大风之间的相关性,即日平均风或日极大风自身的季节性差异小于日平均风和日极大风之间的差异。



注:括号内为不同季节风速时间变化序列与年平均风速的相关性,均通过99%的显著性检验。

图7 风速时间变化趋势

Fig. 7 The time evolution of wind speed

表2 不同时段日平均风速与日极大风速相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between daily mean and extreme wind speed in different periods

时段	全年	冬季	春季	夏季	秋季
1951—2018年	0.86	0.85	0.86	0.83	0.74
1959—2003年	0.83	0.85	0.86	0.73	0.73
2003—2018年	0.94	0.90	0.74	0.94	0.86

注:均通过99%显著性检验。

除了长期的风速变化,短期的风速增长率能帮助我们更细致地了解风速变化特征,计算每十年风速增长率,如表3所示。可以看出日平均风在1960年前略有上升,1960—2010年有明显的下降趋势,在此期间,日平均风速累计下降幅度为17.1%,其中1980年前后风速下降最为明显,至2010年后呈微弱的上升趋势。日极大风的风速年平均变化趋势与日平均风类似,但增长率绝对值更大,长期累计下降幅度为20.0%,趋势更为明显,其中日极大风速下降趋势最明显时间为1990年前后。从季节角度来看,无论是日平均风速还是日极大风速,总的变化趋势与全年相差不大,其中冬春季的风速增长率较大,变化趋势与全年也更为相近,这为风速的变化主要是由于较大风速的变化引起提供了一定的理论支撑,也说明了研究日极大风速对未来风速进行预测的意义。

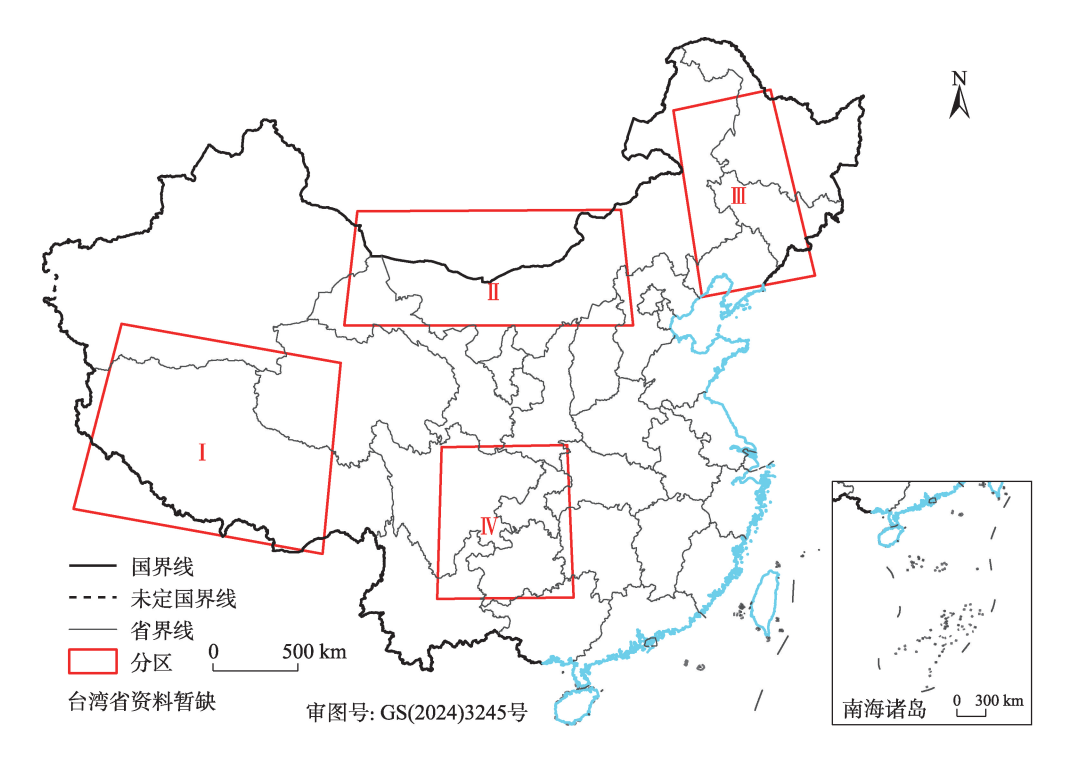
2.4 不同区域的对比分析

经过对风速特征的深入分析,发现风速特征存在明显的区域差异,因此,在参考前人分区依据的前提之下,主要依据风速大小选取4个代表性区域,如图8所示,其中风速较大的Ⅰ~Ⅲ区分别是青藏高原区域、内蒙古区域和东北区域,风速较小的Ⅳ区为重庆、贵州及四川东部的合并。除了风速大小的差异外,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区日平均风速与日极大风速之比较小,而Ⅳ区较大。为了明确不同区域对全国风速的影响,绘制了各区域的风速变化趋势,如图9所

表3　日平均风速与日极大风速的增长率

Tab. 3　The growth rate of daily mean wind speed and daily extreme wind speed

		风速增长率/%						
		1960年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代	累计增长率
日平均风	全年	1.0	0.8	−9.9	−6.5	−3.5	1.0	−17.1
	冬季	−0.8	−2.1	−10.7	−7.5	−2.3	2.7	−20.7
	春季	1.2	1.0	−9.7	−7.1	−4.2	−0.4	−19.2
	夏季	1.1	4.6	−9.2	−5.4	−3.3	0.9	−11.3
	秋季	1.4	0.1	−9.9	−5.7	−4.1	1.1	−17.1
日极大风	全年	3.1	−5.3	−0.2	−10.2	−4.3	−0.3	−17.2
	冬季	2.6	−5.7	−0.4	−11.4	−6.7	0.2	−21.4
	春季	1.7	−7.8	−1.4	−9.9	−1.9	1.1	−18.2
	夏季	5.5	−3.7	−0.3	−8.4	−4.9	−1.7	−13.5
	秋季	1.2	−2.8	0.8	−10.4	−6.2	−1.2	−18.6

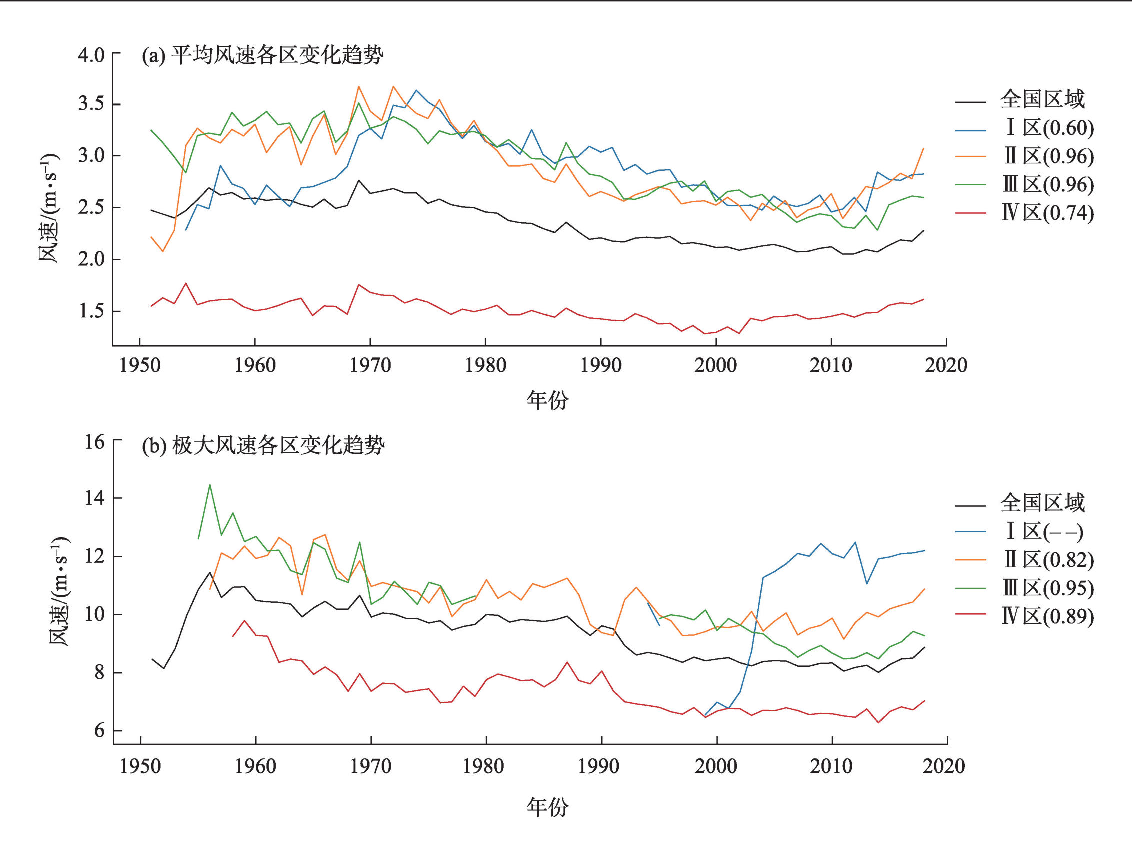


注:Ⅰ区范围80°~95°E,27°~37°N;Ⅱ区范围95°~115°E,39°~45°N;Ⅲ区范围120°~128°E,40°~50°N;Ⅳ区范围102°~110°E,25°~33°N,只选择区域内中国站点进行分析。

图8　中国风速4个分区的分布

Fig. 8　The distribution of the four zones of China based on wind speed

示,其中Ⅰ区地形条件复杂,台站分布稀疏,在2003年以后才有较为准确的极大风速数据的统计,前期数据缺失过多,这是造成Ⅰ区在2000年以后极大风速迅速升高的可能原因,前人通过利用数学方法等对相关数据进行插补和延长减弱数据缺失带来的影响[30-31],但通过对比2003—2018年(图略)与1951—2018年的风速特征发现不同台站数量下的特征表现较为一致,因此暂不针对该区域数据过多讨论,相关系数也暂不计算。其他区域中,各区的风速变化趋势与全国相似,基本呈下降趋势,其中风速较大的Ⅱ、Ⅲ区风速与全国区域风速的相关性较高,除了Ⅱ区极大风速的相关性为0.82,其余均达0.95以上,而风速较小的Ⅳ区的相关性,分别仅有0.74和0.89,因此,认为风速较大的区域风速变化更明显,全国风速的变化趋势主要受风速较大的区域影响,其中Ⅰ区在2003年以后的变化趋势与全国一



注:括号内为不同区域与全国风速的相关系数,均通过99%的显著性检验,--表示相关系数暂不计算。

图9 全国区域与不同分区风速时间变化趋势

Fig. 9 Temporal trend of wind speed in different regions and regions of the country

致,作为"大风区"与Ⅱ、Ⅲ区一同影响全国风速变化趋势。

为了更直观地展现不同区域日平均风和日极大风之间的关系,计算全国与不同区域日极大风速与日平均风速相关系数,其中,1951—2018年时段存在部分年份的缺测,因此该时段相关系数的计算选取各区无缺测的所有年份,如表4所示。容易看出风速较大的区域日平均风与日极大风有较强的相关性,其他区域相关性较差。无论是全国范围还是特定区域,日平均风或日极大风与自身风速相关性较高,日平均风和日极大风之间的相关性较低,这说明二者自身在不同区域的差异小于二者之间的差异,进一步说明对二者分别进行讨论的必要性。

表4 不同时段内全国与各区的日极大风速与日平均风速相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient between daily extreme wind speed and daily mean wind speed in different periods of time in China and different regions

时段	全国	Ⅰ区	Ⅱ区	Ⅲ区	Ⅳ区
1951—2018年	0.86**	–	0.70**	0.88**	0.48**
1959—2003年	0.83**	–	0.62**	0.55**	0.52**
2003—2018年	0.94**	–	0.84**	0.96**	0.53*

注:**表示通过99%的显著性检验,*表示通过95%的显著性检验,–表示相关系数暂不计算。

3 结 论

通过分别对中国日平均风速和日极大风速的空间分布、风速概率密度分布、不同阈值风速之间的关系以及时间序列进行对比分析,讨论中国日平均风与日极大风气候特征,得出以下结论:

(1)我国日平均风速主要集中在0.9~4.1 m·s^{-1},日极大风速主要集中在4.9~12.6 m·s^{-1},其中在青藏高原地区、内蒙古地区及东北中部地区风速较大,四川盆地风速较小。日平均风速不同季节风速变化较小,日极大风速不同季节风速变化更为明显,特别是在青藏高原地区。

(2)不同阈值风速的空间分布基本与气候态风速分布一致,其中日平均风速概率分布显示有较大

概率出现较小风速,而日极大风速则有较大概率出现较大风速,即更接近正态分布。日极大风速和日平均风速的比值反映了较大风速的出现概率,比值越小,日极大风速和日平均风速在日变化出现大值的概率越大。

(3) 无论是日平均风还是日极大风,在2010年之前,风速变化整体呈现下降趋势,从地区看,内蒙古、华北和西南地区最为显著,从时段看,1980—2000年下降最为显著,到2010年后有微弱上升,其中内蒙古等地风速回升最为显著。分别从不同季节和不同区域二者的增长率来看,风速较大的季节和区域风速下降更为显著。此外无论是日平均风还是日极大风,风速下降较多的季节与区域的风速变化和全年与全国区域平均风速的相关较好。

本次研究主要使用了站点数据,虽然数据本身真实可靠,但依然有一定的局限性,例如站点地理位置分散,数据分辨率较低,因此在未来的研究中,可以考虑使用其他再分析数据对我国风速的分布特征进一步讨论。另外,关于2010年后风速回升是否与气候内部变率有关,以及全球变暖对中国风速下降的影响是否仍然成立等,都是值得进一步关注和研究的重要科学问题。

参考文献(References):

[1] 温敏, 张人禾, 杨振斌. 气候资源的合理开发利用[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 896-1002. [Wen Min, Zhang Renhe, Yang Zhenbin. Rational development and utilization of climate resources[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(6): 896-1002.]

[2] 李耀华, 孔力. 发展太阳能和风能发电技术加速推进我国能源转型[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 426-433. [Li Yaohua, Kong Li. Developing solar and wind power generation technology to accelerate China's energy transformation[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 426-433.]

[3] Liu F, Sun F, Liu W, et al. On wind speed pattern and energy potential in China[J]. Applied Energy, 2019, 236(45): 867-876.

[4] 丁一汇, 李霄, 李巧萍. 气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展[J]. 应用气象学报, 2020, 31(1): 1-12. [Ding Yihui, Li Xiao, Li Qiaoping. Advances of surface wind speed changes over China under global warming[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(1): 1-12.]

[5] Shen C, Zha J, Wu J, et al. Centennial-Scale variability of terrestrial near-surface wind speed over China from reanalysis[J]. Journal of Climate, 2021, 34(14): 5829-5846.

[6] Lin C, Yang K, Qin J, et al. Observed coherent trends of sur-face and upper-air wind speed over China since 1960[J]. Journal of Climate, 2013, 26(9): 2891-2903.

[7] Zhang Z, Wang K. Stilling and recovery of the surface wind speed based on observation, reanalysis, and geostrophic wind theory over China from 1960 to 2017[J]. Journal of Climate, 2020, 33(10): 3989-4008.

[8] Zha J, Shen C, Zhao D, et al. Slowdown and reversal of terrestrial near-surface wind speed and its future changes over eastern China [J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(3): 03402.

[9] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236. [Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et, al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62 (2): 228-236.]

[10] 黄小燕, 张明军, 王圣杰, 等. 西北地区近50年日照时数和风速变化特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(5): 825-835. [Huang Xiaoyan, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Characteristics of variation in sunshine duration and wind speed in the last 50 years in Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(5): 825-835.]

[11] 汪宗成, 杨晓玲, 李天江, 等. 武威市平均风速变化特征及其对气候变暖的响应[J]. 江西农业学报, 2018, 30(12): 70-75, 82. [Wang Zongcheng, Yang Xiaoling, Li Tianjiang, et al. Variation characteristics of average wind speed and its response to climatic warming in Wuwei City[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30 (12): 70-75, 82.]

[12] Zhang R, Zhang S, Luo J, et al. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958-2015[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(72): 2785-2801.

[13] 朱蓉, 王阳, 向洋, 等. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 409-418. [Zhu Rong, Wang Yang, Xiang Yang, et al. Stydy on climate characteristics and development potential of wind energy resources in china[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(6): 409-418.]

[14] 熊敏诠. 近30年中国地面风速分区及气候特征[J]. 高原气象. 2015, 34(1): 39-49. [Xiong Minquan. Climate regionalization and characteristics of surface winds over China in recent 30 years[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(1): 39-49.]

[15] Ying J, Yong L, Zhao Z, et al. Changes in wind speed over China during 1956-2004[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 99(3-4): 421-430.

[16] Zha J, Zhao D, Wu J, et al. Numerical simulation of the effects of land use and cover change on the near-surface wind speed over Eastern China[J]. Climate Dynamics, 2019, 53(3-4): 1-21.

[17] Miao H, Xu H, Huang G, et al. Evaluation and future projections of wind energy resources over the Northern Hemisphere in CMIP5 and CMIP6 models[J]. Renewable Energy, 2023, 211(33): 809-821.

[18] Moemken J, Reyers M, Pinto J G. Future changes of wind energy

potentials over Europe in a large CMIP5 multi-model ensemble[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(12): 783–796.

[19] Pryor S C, Barthelmie R J. Climate change impacts on wind energy: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 430–437.

[20] 林湘宁, 丁苏阳, 王子璇, 等. 恶劣风况下的风机最大容许出力模型及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 309–317, 397. [Lin Xiangning, Ding Suyang, Wang Zixuan, et al. The maximum output model of wind turbine and its control strategy under severe wind conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 309–317, 397.]

[21] 范兰艳, 冯淑霞, 李书君, 等. 我国北方沙尘暴天气气候特征及成因分析[J]. 现代农业科技, 2016, (3): 276–277. [Fan Lanyan, Feng Shuxia, Li Shujun, et al. Climatic characteristics and cause analysis of sandstorm in Northern China[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016, (3): 276–277.]

[22] Yu R, Zhang X, Li G, et al. Analysis of frequency variation of thunderstorm, hail and gale wind in Eastern China from 1971 to 2000 [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(10): 1207–1216.

[23] Gan S, Zhang W, Zong H, et al. Analysis of typhoon storm surge disasters along the south China coast and disaster prevention measures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012, 31(6): 51–58.

[24] 何云燕, 林确略, 杨礼林, 等. 2010年后汛期一次东风波雷雨大风天气分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(4): 2264–2267, 2317. [He Yunyan, Lin Quelue, Yang Lilin, et al. Analysis on an easterly wave thunderstorm and gale weather during the latter flood season of 2010[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(4): 2264–2267, 2317.]

[25] 郑祚芳, 张秀丽, 丁海燕. 近50年北京地区主要灾害性天气事件变化趋势[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 47–52. [Zheng Zuofang, Zhang Xiuli, Ding Haiyan. Change trend of extreme weather events in Beijing area in recent 50 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 47–52.]

[26] 何志强, 卢新平, 王丙兰. 首都机场雷暴大风的初步研究[J]. 气象, 2014, 40(11): 1408–1413. [He Zhiqiang, Lu Xinping, Wang Binglan. Preliminary study of thunderstorm gale at Beijing Capital International Airport[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(11): 1408–1413.]

[27] 方翀, 王西贵, 盛杰, 等. 华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1368–1385. [Fang Chong, Wang Xigui, Sheng Jie, et al. Temporal and spatial distribution of North China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(5): 1368–1385.]

[28] 王慧, 张璐, 石兴东, 等. 2000年后青藏高原区域气候的一些新变化[J]. 地球科学进展, 2021, 36(8): 785–796. [Wang Hui, Zhang Lu, Shi Xingdong, et al. Some new changes of the regional climate on the Tibetan Plateau since 2000[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(8): 785–796.]

[29] Wang J, Feng J, Yan Z, et al. An analysis of the urbanization contribution to observed terrestrial stilling in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(3): 034062.

[30] Xie P, Xiong A. A conceptual model for constructing high-resolution gaugesatellite merged precipitation analyses[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D21): 21106.

[31] 刘田, 阳坤, 秦军, 等. 青藏高原中、东部气象站降水资料时间序列的构建与应用[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1449–1457. [Liu Tian, Yang Kun, Qin Jun, et al. Construction and applications of time series of monthly precipitation at weather stations in the Central and Eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(6): 1449–1457.]

Comparative study on climate characteristics of daily mean wind and daily extreme wind throughout China

NAN Yukun[1], LIU Peng[1], WANG Wei[2,3,4], CHEN Yizhi[2,3,4]

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environmental Change, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China; 3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, Jiangsu, China; 4. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: Studies have identified a long-term decline in the mean surface wind speed in China under the background of global warming. However, whether the extreme wind speed is consistent with the mean wind speed is worthy of investigation. Through the comparative analysis of the daily mean wind speed data and daily extreme wind speed data from the national basic weather stations for the years 1951 to 2018, the following conclusions are drawn: Nationwide, the daily mean wind speed is mainly concentrated at approximately 2 $m \cdot s^{-1}$ and the daily extreme wind speed is mainly concentrated at approximately 8 $m \cdot s^{-1}$; both wind speeds are larger in the Qinghai-Xizang Plateau and Inner Mongolia. In addition, the daily mean wind speed is more likely to be smaller, whereas the probability distribution of daily extreme wind speed is closer to a normal distribution. From 1960 to 2010, the daily mean wind speed decreased by 19%, while the daily extreme wind speed decreased even more significantly, up to 20%. However, after 2010, with the intensification of global warming, both speeds slightly rebounded; in particular, the daily mean wind speed has increased more significantly. These findings emphasize the importance of continuous attention and research into wind speed changes in the context of global warming, which are extremely helpful in comprehending the characteristics of surface wind speed changes in China, as well as providing a scientific reference for wind speed forecasting and wind energy development projects.

Keywords: daily mean wind speed; daily extreme wind speed; climatic characteristics; differences in wind speed